

## PŘENOS TEPLA PŘI ODLÉVÁNÍ DO SKOŘEPINOVÝCH FOREM

M. KOVÁČ<sup>1</sup>, J. ROUČKA<sup>2</sup>, V. KRUTIŠ<sup>3</sup>, M. JAROŠ<sup>4</sup>, A. JOCH<sup>5</sup>

**ABSTRACT:** Temperature distributions in investment castings and shells within solidification are of great influence on the quality of investment castings. Problematic of a heat flux in the investment casting is specific against the other casting technologies as the thickness and volume of the shell is much lower than that of other types of molds. Accumulation of the heat in the shell is much lower so most of the heat is radiated to environment.

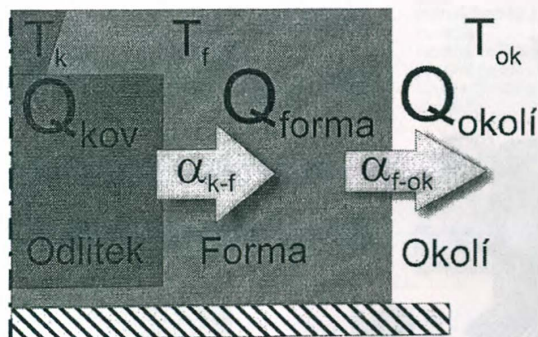
Possibilities of the simulation are influenced by a heftiness of boundary conditions and accessibility of correct thermo-physical data.

Objective of this article is to outline problematic of heat flux in metal-mold-environment system.

**KEYWORDS:** Numerical simulations, investment casting, heat transfer

### TEORETICKÝ ROZBOR PŘENOSU TEPLA V SYSTÉMU ODLITEK – SKOŘEPINOVÁ FORMA – OKOLNÍ PROSTŘEDÍ

Krystalizace odlitků ve skořepinových formách je řízena způsobem přenosu tepla v systému odlitek-skořepinová forma-okolní prostředí, které se uskutečňuje podle schématu na obr.1.



Obr. 1: Přenos tepla z odlitku v intervalu tuhnutí

Z odlitého kovu je v průběhu tuhnutí nutno odvést teplo přehřátí z tekutého kovu a krystalizační teplo. Toto teplo je ve skořepinové formě částečně akumulováno a částečně odvedeno do chladnějšího okolního prostředí přičemž platí:

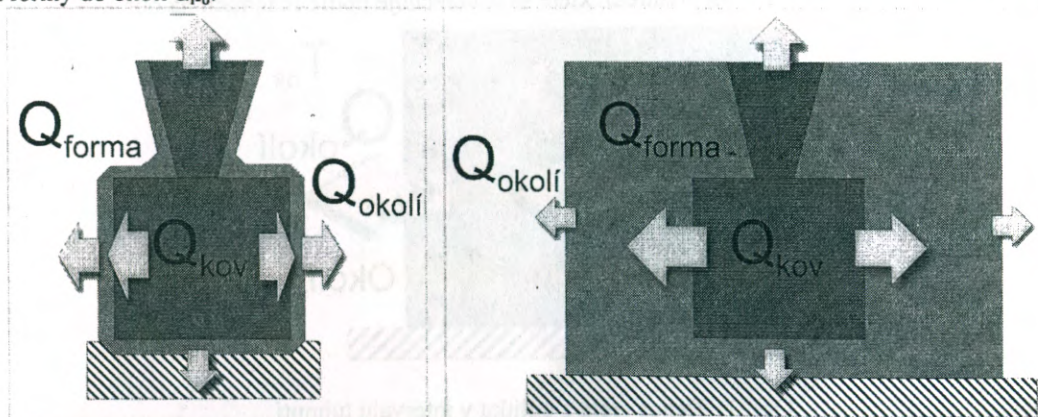
$$\Delta Q_{kovu} = \Delta Q_{formy} + \Delta Q_{okoli} \quad (1)$$

Dynamika procesu přenosu tepla je závislá na:

<sup>1</sup> Ing. Marek Kováč – Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, ČR  
<sup>2</sup> doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc. - Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, ČR  
<sup>3</sup> Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D. - Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, ČR  
<sup>4</sup> Ing. Michal Jaroš, Dr. - Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, ČR  
<sup>5</sup> A. Joch – PBS Velká Bíteš, a.s.

- geometrickém uspořádání a hmotnostech jednotlivých komponent  $m_{\text{kovu}}$  a  $m_{\text{formy}}$
- postupu zaplňování dutiny formy tekutým kovem
- počátečních teplotách všech prvků systému a jejich prostorovém rozložení -  $T_{k,0}(f(x))$ ,  $T_{f,0}(f(x))$ ,  $T_{ok,0}(f(x))$ ,
- intervalu krystalizace  $T_L$  a  $T_S$  a krystalizačním teple kovu  $Q_{\text{krystal}}$ ,
- součiniteli vedení tepla  $\lambda_{\text{kovu}}$  a  $\lambda_{\text{formy}}$ ,
- měrné tepelné kapacitě  $c_{\text{kovu}}$  a  $c_{\text{formy}}$
- hustotách  $\rho_{\text{kovu}}$  a  $\rho_{\text{formy}}$ ,
- podmínkách přenosu tepla z kovu do formy, charakterizovaných součinitelem přestupu tepla  $\alpha_{k-f}$
- podmínkách ochlazování na vnějším povrchu formy, vyjádřené zejména teplotou okolního média  $T_{ok}$  a součinitelem přestupu tepla z formy do okolí  $\alpha_{f-ok}$ .

Tepelné pochody při lití do skořepinových forem se od jiných slévárenských technologií liší podíly tepla akumulovaného ve formě a tepla odvedeného do okolního prostředí. Zatímco při lití do masivních forem z disperzních materiálů (do pískových forem) nebo do forem kovových (tlakové nebo gravitační lití) se převážná část fyzikálního tepla odlitku, odvedeného během tuhnutí akumuluje ve hmotě formy a odvod tepla do okolí představuje podstatně menší část, při lití do žíhaných, relativně tenkostěnných skořepinových forem je rozhodující podíl tepla odvedeného do okolí – obr. 2. Při řešení dynamiky krystalizace je tedy nutno věnovat zvýšenou pozornost tomuto mechanismu transportu tepla a zde je důležité zejména dostatečně přesné stanovení součinitele přestupu tepla z formy do okolí  $\alpha_{f-ok}$ .



**Obr. 2:** Podíly akumulovaného a odvedeného tepla při lití do masivních forem a do skořepin

Teplotní režim formy se formuje v těchto časových etapách:

- žíhání skořepiny
- transport z žíhací pece na licí pole
- prodleva na licím poli do počátku lití
- odvod tepla z formy po odlití kovu

Lze předpokládat, že v okamžiku vyjmutí formy ze žíhací pece je ve formě homogenní teplotní pole.

Vytvoření počátečního teplotního profilu skořepinové formy začíná ochlazováním po jejím vyjmutí ze žíhací pece a při transportu formy na licí pole. Odvod tepla je v této fázi převážně radiací a konvekcí do okolního prostředí, přičemž se jedná o poměrně těžko definovatelné podmínky, v nichž se částečně uplatňuje i nucené ochlazování, způsobené pohybem formy a vzduchu.



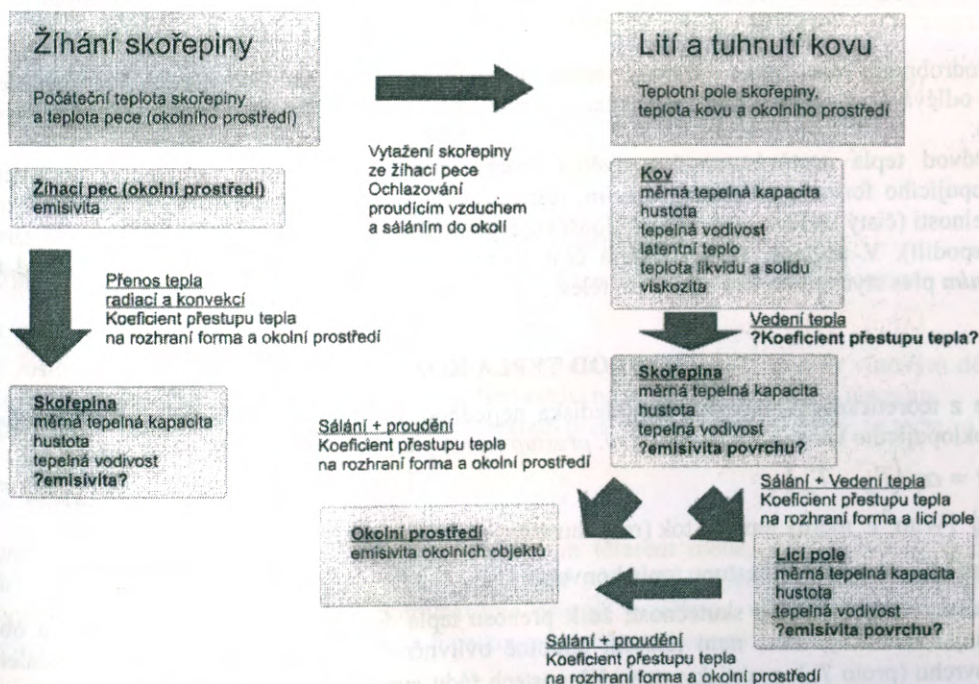
V prodlevě na licím poli do okamžiku lití se jedná o standardní způsob odvodu tepla prouděním a sáláním do okolního prostředí. Při něm se uplatní nejen vliv geometrické konfigurace licího stromečku, ale i vlivy vzájemného tepelného působení sousedních forem. Odvod tepla může být cfleně ovlivňován aplikací lokálních tepelných izolací.

Řešení průběhu chladnutí a krystalizace kovu je proto nutno řešit komplexně ve všech uvedených etapách. Možnosti analytického řešení jsou jen velmi omezené a je nutno využít metod numerické simulace.

## NUMERICKÁ SIMULACE PŘENOSU TEPLA VE SKOŘEPINOVÝCH FORMÁCH

Numerické řešení problému transportu tepla z tekutého kovu a z formy do okolního prostředí vyžaduje zadání počátečních a okrajových podmínek a tepelně-fyzikálních parametrů všech složek.

Databáze simulačních programů pro výpočet průběhu tuhnutí a chladnutí odlitků v současné době disponují řadou tepelně-fyzikálních parametrů pro odlévané materiály a materiály forem. Pro řadu materiálů však nejsou známy a rovněž nejsou spolehlivě verifikovány. Existují i doporučené hodnoty podmínek přestupu tepla mezi odlitkem a formou, charakterizované součinitelem přestupu tepla z kovu do formy  $\alpha_{k-f}$ . Ani tyto hodnoty však nejsou pro podmínky lití do skořepin dostatečně ověřené. Celkově je nutno znalosti podmínek odvodu tepla z formy do okolí považovat za nedostatečné.



Obr. 3: schéma přestupu tepla při procesu přesného lití a termofyzikální data nutná pro numerický výpočet

Na výslednou intenzitu odvodu tepla ze skořepin mají významný vliv podmínky přestupu tepla z vnějšího povrchu skořepiny do okolí a vliv vzájemného tepelného ovlivnění prvků skořepinových forem v důsledku geometrického uspořádání odlitků na licím stromečku, eventuálně ovlivnění od sousedících forem. Na obrázku 3. je znázorněno schéma žihání skořepiny, odlévání a tuhnutí kovu. Toto schéma zjednodušeně ukazuje materiálová tepelně – fyzikální data, počáteční a okrajové podmínky, které jsou nutné pro výpočet přestupu tepla. Velice důležitými parametry, které v současnosti ovšem nejsou přesně známy, jsou koeficient přestupu tepla na rozhraní kov – forma a také emisivita povrchu skořepiny. Způsob získání těchto parametrů bude popsán dále.



## AKUMULACE TEPLA Z KOVU VE SKOŘEPINĚ KOEFICIENT PŘESTUPU TEPLA MEZI KOVEM A SKOŘEPINOU

Jedná se o standardní úlohu přestupu tepla mezi odlitkem a formou vedením přes rozhraní obou prostředí. Tepelný tok je v každém okamžiku určen rovnicí

$$\dot{q}_{k-f} = \alpha_{k-f} \cdot (T_k - T_f) \quad (2a)$$

kde:  $\alpha_{k-f}$  – je součinitel přestupu tepla mezi kovem a formou

$T_k$  – teplota kovu

$T_f$  – teplota formy

Část tohoto tepla je ve formě akumulováno v souladu se vztahem (2b), část je odvedena do okolního prostředí.

$$\dot{q}_{f-ak} = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \quad (2b)$$

kde:  $m_f$  – je hmotnost elementu formy

$c_f$  – měrné specifické teplo formy

$\Delta T$  – změna teploty formy

## ODVOD TEPLA Z VNĚJŠÍHO POVRCHU SKOŘEPINY DO OKOLÍ

Podrobněji rozebereme přestup tepla z formy do okolního prostředí. Předpokládejme, že se odlévá samonosná skořepina, uložená na podložku s malou intenzitou ochlazování (pískové lící pole).

Odvod tepla nastává zejména dvěma mechanismy – **prouděním** (konvekci) do vzduchu obklopujícího formu a **zářením** (sáláním, resp. radiací) na chladnější povrchy, které jsou v přímé viditelnosti (čistý vzduch je v malých tloušťkách prakticky průteplivý, tzn. na přenosu tepla zářením se nepodílí). V případě, že se některá část formy dotýká pevných těles, nastává i odvod tepla **vedením** přes styčnou plochu do těchto těles.

## ODVOD TEPLA KONVEKCI

Je z teoretického i výpočtového hlediska nejjednodušší. Pro přenos tepla z pevného povrchu do obklopujícího tekutého prostředí (tzv. *přestup tepla*) platí *Newtonův ochlazovací zákon*

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad (3)$$

Kde  $\dot{q}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] měrný tepelný tok (resp. hustota tepelného toku),

$\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$ ] součinitel přestupu tepla konvekci

Tento vztah vyjadřuje skutečnost, že k přenosu tepla dochází mezi povrchem tělesa a oblastí tekutiny (vzduchu), která není tělesem teplotně ovlivněna – teoreticky v nekonečné vzdálenosti od povrchů (proto  $T_\infty$ ), prakticky ve vzdálenostech řádu *mm* až *cm*. Oblast, v níž dochází ke změně teploty z nedotčeného okolí  $T_\infty$  na teplotu povrchu  $T_w$  (wall – stěna formy), vymezuje tzv. *mezní vrstvu*. Mezní vrstva představuje pro přenos tepla odpor.

Intenzitu přestupu tepla vyjadřuje *součinitel* (koeficient) *přestupu tepla*  $\alpha$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]. Jeho velikost závisí na vlastnostech média, rychlosti a charakteru proudění i geometrii obtékaného povrchu.

Hodnota součinitele přestupu tepla  $\alpha$ , resp.  $\bar{\alpha}$  se určuje z hodnoty *Nusseltova čísla*

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda} \quad (4a)$$

resp.



$$\overline{Nu} = \frac{\overline{\alpha} \cdot L_c}{\lambda} \quad (4b)$$

kde  $L_c$  [m] je tzv. charakteristický rozměr (je dán geometrií obtékaného povrchu),  
 $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] je součinitel tepelné vodivosti tekutiny.

Vztahy pro výpočet Nusseltova čísla lze pro určité jednoduché situace nalézt v literatuře. Pro praktické využití je potřeba najít situaci, která co nejvíce odpovídá řešenému případu.

## ODVOD TEPLA RADIACÍ

Intenzita tepelného vyzařování těles závisí na teplotě a „vyzařovací schopnosti“ jejich povrchu. Pro tzv. *absolutně černé těleso* (AČT) je celkový tok energie vyzařovaný jednotkou povrchu – tzv. *zářivost*  $E_0$  – dán *Stefan-Boltzmannovým zákonem*

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (5)$$

kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}]$  je tzv. *Stefan-Boltzmannova konstanta*.

Tato energie je rozložena do celého spektra vlnových délek (teoreticky od nuly až po nekonečno). Tzv. *monochromatická* (spektrální) *zářivost*  $E_{0,\lambda}$ , tzn. tok energie vyzařované v určitém (jednotkovém) rozsahu vlnových délek  $\lambda$ , je pro AČT popsána *Planckovým zákonem*

$$E_{0,\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot T \cdot \lambda}\right) - 1 \right]} = f(T, \lambda) \quad (6)$$

kde  $c \cong 3 \cdot 10^8$  m/s je rychlost světla,  
 $h, k$  jsou Planckova a Boltzmannova konstanta.

Vlnová délka s maximálním vyzařováním je určena *Wienovým posunovacím zákonem*

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897,8 \quad [\mu\text{mK}] \quad (7)$$

S rostoucí teplotou se tedy maximum vyzařování posouvá směrem ke *kratším* vlnovým délkám (viz obr. 5). Proto výsledná „barva“ tepelného záření závisí na teplotě vyzařujícího povrchu.

Celkovou vyzářenou energii pak dostaneme integrací přes všechny vlnové délky. Je tedy

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0,\lambda}(T, \lambda) \cdot d\lambda = f(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

*Ostatní tělesa* vyzařují v porovnání s absolutně černým tělesem méně, a to na všech vlnových délkách. Poměr zářivostí obou povrchů (při stejné teplotě) vyjadřuje *poměrná zářivost-monochromatická* (spektrální), pokud porovnáváme energii vyzářenou v určitém malém rozsahu vlnových délek, resp. *celková*, porovnáváme-li celkovou vyzářenou energii:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{0,\lambda}} \quad [-], \quad \varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad [-] \quad (9a, b)$$

Symboly  $E, E_{\lambda}$  zde označují tytéž veličiny jako  $E_0, E_{0,\lambda}$ , avšak pro reálné (tedy nikoliv „absolutně černé“) těleso. Platí tedy  $0 < \varepsilon_{\lambda} < 1, 0 < \varepsilon < 1$ .

Hodnota monochromatické emisivity závisí obecně na vlnové délce a na teplotě vyzařujícího povrchu:

$$\varepsilon_{\lambda} = f(\lambda, T) \quad (10a)$$

Protože s rostoucí teplotou se převládá část vyzařovaného tepelného záření posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám, může se hodnota *celkové emisivity*  $\varepsilon$  měnit s teplotou:



$$\varepsilon = f(T) \quad (10c)$$

Jestliže předpokládáme, že poměrná spektrální zářivost  $\varepsilon_\lambda$  je v celém rozsahu vlnových délek konstantní, pak platí:

$$\varepsilon_\lambda = \text{konst.} \quad (11)$$

Takovéto těleso, resp. povrch nazýváme *šedým tělesem* (povrchem).

Znamená to, že i celková poměrná zářivost šedého tělesa je konstantní a nezávisí na teplotě. Reálná tělesa se budou takto přibližně chovat, nebude-li docházet k příliš velkým změnám jejich teplot.

## EMISIVITA

**Reálné hodnoty** spektrální i celkové **emisivity** závisí především na materiálu a povaze (kvalitě opracování) povrchu a pohybují se od 0,02 pro leštěné zlato až po 0,97 (sníh, některé nátěry aj.). **Emisivita keramických materiálů se pohybuje mezi 0,4 a 0,8.** Hodnoty pro jednotlivé materiály a typy povrchů se uvádí např. v [1–3].

Emisivita povrchu skořepin je důležitým parametrem při odvodu tepla z kovu hlavně díky nižší akumulaci tepla ve formě oproti jiným technologiím a nutnosti odvodu energie do okolí. Emisivita byla experimentálně zjišťována pomocí termokamery snímající povrch skořepiny a termočlánkem, kterým byla zaznamenána povrchová teplota potřebná při výpočtu emisivity. Tímto způsobem byla zjištěna hodnota emisivity 0.9 pro molochitové skořepiny. Tato hodnota se dá považovat za konstantní pro rozmezí teplot 500 – 1 100 °C.

## ODVOD TEPLA VEDENÍM Z VNĚJŠÍHO POVRCHU FORMY

Dotýká-li se forma jiných pevných těles (např. pískového lože apod.), je nutno předpokládat i odvod tepla *vedením přes styčné plochy* do okolního materiálu.

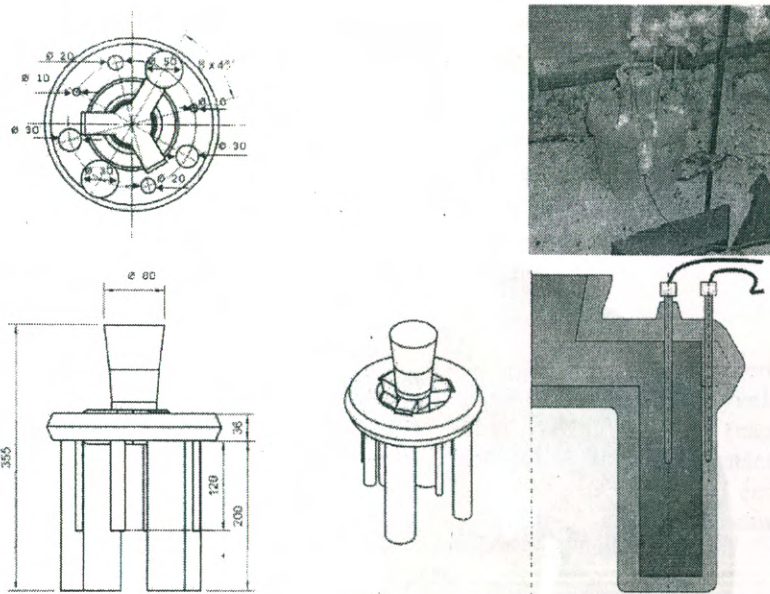
Řešit tento problém analytickou cestou je prakticky nemožné. Podlaha představuje z tohoto hlediska polonekonečné těleso, forma se však dotýká pouze jeho části. Analytické řešení takového situace není známo. Celý děj je navíc nestacionární, protože teplota podlahy se bude v důsledku přívodu tepla zvyšovat.

Problém je **řešitelný pouze numerickým výpočtem**. Situaci komplikuje nepřesná znalost *tepelného kontaktního odporu* mezi formou a podlahou. Lze očekávat, že odvod tepla do tepelně neizolované podložky (podlahy) bude značný, pravděpodobně řádově vyšší než z volných ploch formy, na pískovém loži, nebo na izolační podložce však bude podstatně menší.

## POROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNĚ NAMĚŘENÝCH DAT SE SIMULACÍ

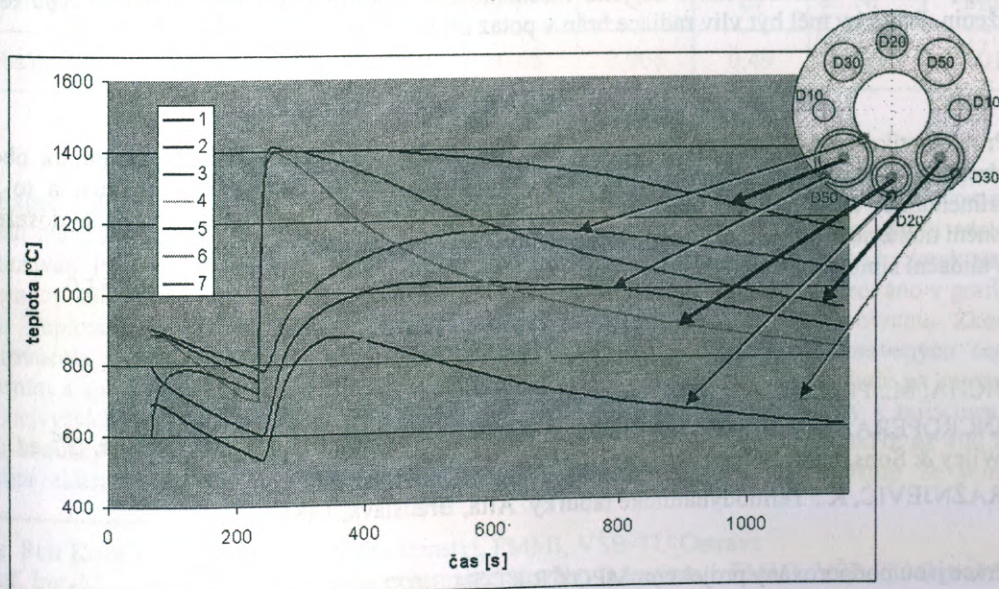
Předpokládáme, že přenos tepla radiací mezi odlitky a popřípadě mezi jednotlivými částmi odlitku bude mít výrazný vliv na utváření teplotního pole odlitku. Pro ověření tohoto vlivu byl připraven následující experiment, který byl ověřen simulací. Na jednoduchý rozváděcí kruh bylo připojeno 8 odlitků ve tvaru válců s průměry 50, 30, 20 a 10 mm. Geometrie odlitku, zapojení termočlánků a fotografie experimentu jsou zobrazeny na obrázku 4. Do skořepinové formy byla odlévána niklová slitina N155. Skořepinová forma vyrobená obalováním měla průměrnou tloušťku stěny 8 mm. Teploty byly zaznamenávány termočlánky umístěnými na geometrických středech odlitků o průměrech 50, 30 a 20 mm. Další termočlánky měřily teplotu ve skořepinovém obalu těchto odlitků. U odlitku s průměrem 50 mm byly teploty ve skořepině měřeny v místě (A) nejbližším středu celé odlévané soustavy a v místě nejdálejší (B). V místě A dochází k nejsilnějšímu tepelnému ovlivnění od ostatních odlitků a naopak v místě B je tento vliv nejmenší. Toto tvrzení mělo být potvrzeno experimentem a zároveň ukázat jak velký rozdíl teplot může být radiací způsoben.





**Obr 4:** Geometrie odlévané soustavy, fotografie odlité skořepiny a umístění termočlánků v kovu a ve skořepinové formě

Pomocí měřicí soustavy (termočlánky – A/D převodník – Notebook – SW DAQview) byly zaznamenány teploty vynesené v grafu 1. Průběhy teplot jednak ukazují veliké rozdíly v rychlostech tuhnutí v jednotlivých odlitcích, ale také výrazné rozdíly v teplotách v různých místech skořepiny. Teplo dodávané kovem zvýšilo teplotu skořepiny přibližně o 400°C. Důležité bylo především srovnání teplot v místech A a B. Zde byl rozdíl teplot asi 200°C. Rozdíl byl způsoben vlivem radiace z okolních odlitků. Tento vliv nezměnil pouze teplotní pole skořepiny, ale ovlivnil také rychlost přestupu tepla mezi kovem a skořepinou. Tak byla tepelná osa posunuta mimo geometrickou osu odlitků válců směrem do středu odlévané soustavy.

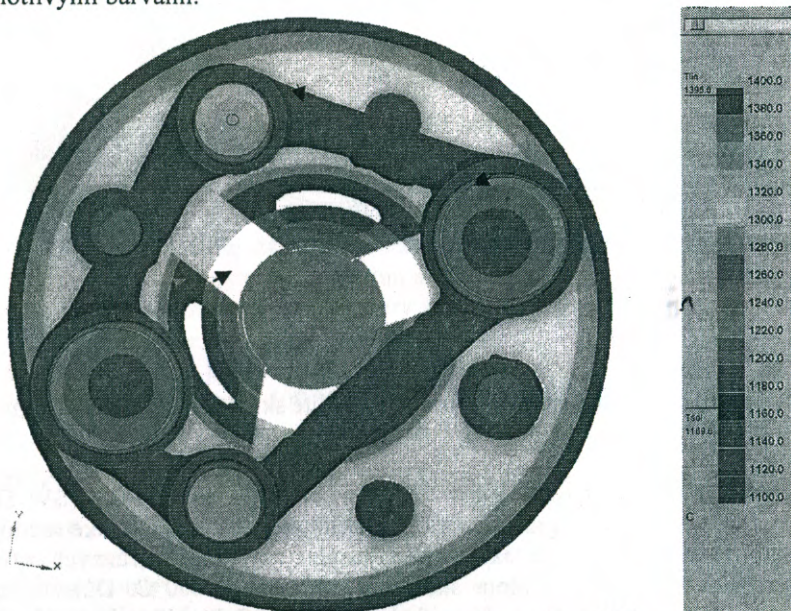


**Graf 1:** Experimentálně zjištěný průběh teplot v odlitku a ve skořepině



Pro odlévanou soustavu byl sestaven 3D model. Ten byl numericky simulován programem ProCAST 2006.1 za účelem ověření dat z experimentu a názornému zobrazení teplotních polí ve skořepině a odlitku. Simulační software ProCAST je schopen zahrnout do výpočtu, kromě přestupu tepla vedením a prouděním, také radiaci do okolí a vzájemné tepelné ovlivnění mezi jednotlivými částmi odlitku.

Napočítané výsledky ukazují, že dochází k posunu tepelné osy odlitků. Tento posun je znázorněn na obrázku 5. V tomto pohledu je zobrazen horizontální řez celou soustavou. Teploty jsou zastoupeny jednotlivými barvami.



**Obr 5:** Teplotní pole v řezu simulovaným odlitkem

Simulace a experiment ukázali, že vliv radiace v technologii přesného lití má podstatný vliv na postup tuhnutí odlitku a tím i na jeho mechanické vlastnosti a možný výskyt vad typu ředin a staženin. Proto by měl být vliv radiace brán v potaz při navrhování technologie lití.

## ZÁVĚR

Problematika přenosu tepla v procesu přesného lití je nyní předmětem zkoumání na oboru Slévárenství v Brně. Snaha je o získání nových, či přesnějších termofyzikálních dat a to jak experimentálně, tak i pomocí simulace slévárenských procesů. Jejich použitím bude dosaženo zpřesnění numerické simulace a tím i kvalitnější predikce vzniku vad v odlitcích.

Validační simulace jsou prováděny pomocí programu ProCAST od fy MECAS ESI s.r.o

## LITERATURA:

- [1] JÍCHA, M.: Přenos tepla a látky. Skripta FSI VUT, CERM s.r.o., Brno, 2001.
- [2] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3<sup>rd</sup> ed. J. Wiley & Sons, New York, 1990.
- [3] RAŽNJEVIĆ, K.: Termodynamické tabulky. Alfa, Bratislava, 1984.

Práce jsou podporovány projektem MPO ČR FT-TA 3/072 a slévárnou PBS Velká Bíteš a.s.